

アーチ格点部の疲労試験

FATIGUE TEST OF PANEL POINT OF DECK ARCH BRIDGE

星尾 司* 寺西功** 田島二郎***

By Tsukasa HOSHIO, Isao TERANISHI and Jiro TAJIMA

In panel point connecting the vertical members with the stiffening girders of deck arch bridges, various joining details are used. In order to clarify their fatigue strength, $\perp$ type specimens of five structural details were made and fatigue tests were carried out under bending. By this tests recommendable stiffening details of panel point was found.

1. まえがき

近年交通量の増大に伴って、道路橋の各部に疲労損傷が数多く発見され報告されている。それら損傷事例の中には、上路式アーチ橋の補剛桁と垂直材との取付部（以下格点部と記す）より亀裂が発生した事例も含まれている。本試験では、この部位に発生する疲労亀裂に着目した。通常設計においては、格点部をピン結合と仮定している。しかし実構造物ではガセットで各部材が結合されているため、この設計上の仮定と実構造物との結合条件の相違が二次応力を生じさせ、格点部に発生する疲労亀裂の要因の一つと考えられる。また格点部の構造詳細は設計者によってまちまちであり、その詳細が必ずしも疲労の面から好ましくないものもあると考えられた。そこで実際の設計に役立たせるため、アーチ格点部の構造詳細を実橋の構造詳細を参考にして、形状の異なったものを5種類モデル化して疲労試験を行った。この試験を通して、格点部の構造詳細の違いが疲労強度に及ぼす影響を確認した。

2. 試験方法

2. 1 供試体および載荷方法

実験に用いた供試体は補剛桁と垂直材との取付部を試験対象とした。図1に示すようにタイプAは垂直材

* 工修 (株)栗本鐵工所 東京橋梁設計課 (〒105 東京都港区新橋4丁目1-9)

** (株)栗本鐵工所 東京橋梁設計課 (〒105 東京都港区新橋4丁目1-9)

*** 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

取付ガセットに対応する補強材が補剛桁にないもの、タイプB、Dはフランジ縁に補剛桁高さの途中までのフランジを付け、後者は垂直材ウェブも補剛桁フランジに連結したもの、タイプCはその補剛板が補剛桁高さ一杯まで伸び下フランジに溶接したもの、タイプEは補剛桁ウェブに直角方向に補強材を配したものである。各供試体は1体ずつである。供試体の寸法等は試験機容量等を考えて、補剛桁のフランジ厚は10mm、ウェブ厚・ガセット厚・補強板厚は9mmである。使用材質は全てSS41材で、その機械的性質を表1に示す。

溶接方法は炭酸ガスアーク溶接及び被覆アーク溶接である。溶接材料はガセット・補強板・垂直補剛材の取付にはCO₂溶接用フラックス入りワイヤ、その他の部材の取付には低水素系溶接棒を使用した。溶接姿勢は下向及び横向で行った。予熱は特に行わなかった。溶接完了後は全ての供試体に対して、ガセット端部の補剛桁フランジとのまわし溶接止端のみ軽くグラインダーをかけ、その他の箇所は溶接したままの状態とした。また溶接ビード表面の欠陥の有無を調べるために、浸透探傷試験を実施した。試験の結果欠陥は検出されなかった。

補剛桁と垂直材との連結部はM22、F10Tによる高力ボルト摩擦接合である。

載荷方法は図2に示すように、補剛桁の一端を固定、他端をピンローラとして支持し、垂直材の先端に載荷用棒鋼を介して線荷重を水平方向に与えた。亀裂発生が予想される溶接継手部に対して型取り法によりビード形状（止端部曲率半径 ρ 、余盛角度 θ ）を調べた。

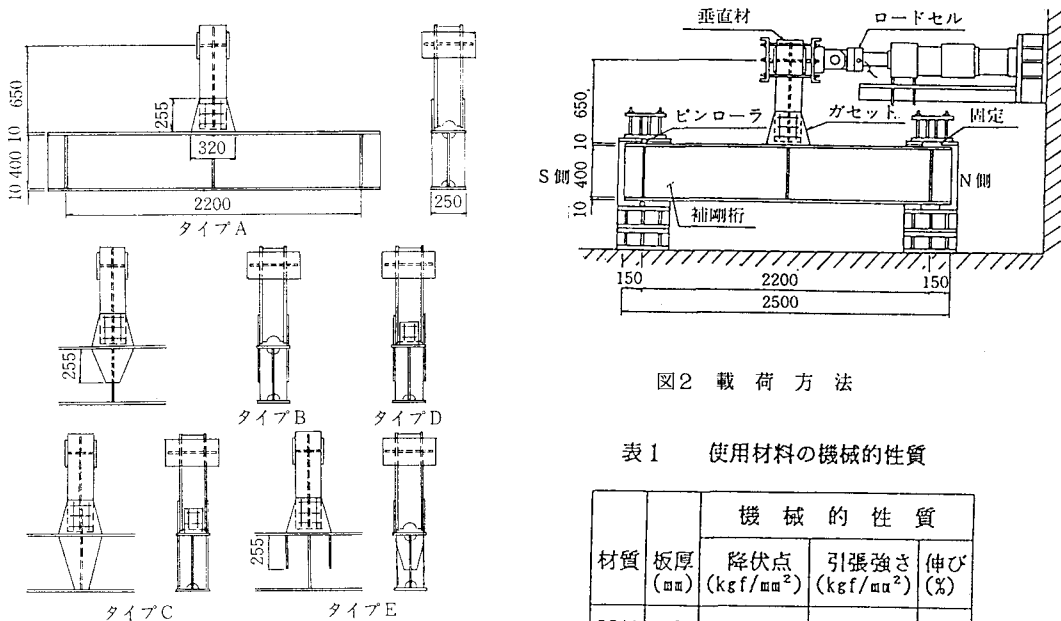


図1 供試体の形状

2. 2 疲労試験

疲労試験は荷重制御の完全両振り荷重で、荷重の繰返し速度は5~8Hzである。なお繰返し数5万回毎に荷重範囲を1/2にして破面にピーチマークを残し、それにより亀裂進展状況を観察できるようにした。繰返し両振り荷重は、供試体の上フランジガセット溶接止端部近傍に発生する最大ひずみが、静的載荷試験により各供試体でほぼ同じくらいの範囲になるように考えた。その結果、各供試体に用いる繰返し両振り荷重はタイプA: $\pm 1.0t$ 、タイプB・D: $\pm 1.5t$ 、タイプC: $\pm 3.0t$ 、タイプE: $\pm 2.0t$ としたが、試験ではその部分のひずみは600~1000 μ くらいとなった。

試験終了後は非破壊検査（外観検査、磁粉探傷試験）を実施し、亀裂が発生していないか調べた。

表1 使用材料の機械的性質

材質	板厚 (mm)	機 械 的 性 質		
		降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)
SS41	9	31	45	30
〃	10	30	46	29

3. 試験結果と考察

3. 1 静的载荷試験

補剛桁フランジのN側ガセット端部の各形式での応力・変位の状況を比較できるように単位荷重当りの応力分布及び変位をそれぞれ図3、図4に示す。これらの図に示す応力・変位の測定位置はガセット端部から補剛桁の支点方向に15mm離れた箇所である。

フランジの応力はガセット下側で十分な補剛をしたタイプCで約190kgf/cm²、タイプEで約90kgf/cm²と小さい。補強板が補剛桁高さの途中までのタイプB、DはタイプCの約5倍の応力が、補剛桁フランジを何等補強していないタイプAはタイプB、Dの約2倍の応力が生じている。フランジ補強の効果が高い程、発生応力が小さくなっている。各タイプ共、繰返し荷重載荷後の単位荷重当りの応力が繰返し荷重載荷前の単位荷重当りの応力に比して極端に小さくなっているのは、繰返し荷重載荷後に応力測定位置近傍において亀裂が生じたためである。

フランジの変位は補剛桁フランジを何等補強していないタイプAで約0.60mmと大きい。補強板が補剛桁高さの途中までのタイプB、DはタイプAのそれぞれ約1/3、1/2の変位が、ガセット下側で十分な補剛をしたタイプC、EはタイプDの約1/7の変位が生じている。フランジ補強の効果が高い程、変位が小さくなっている。

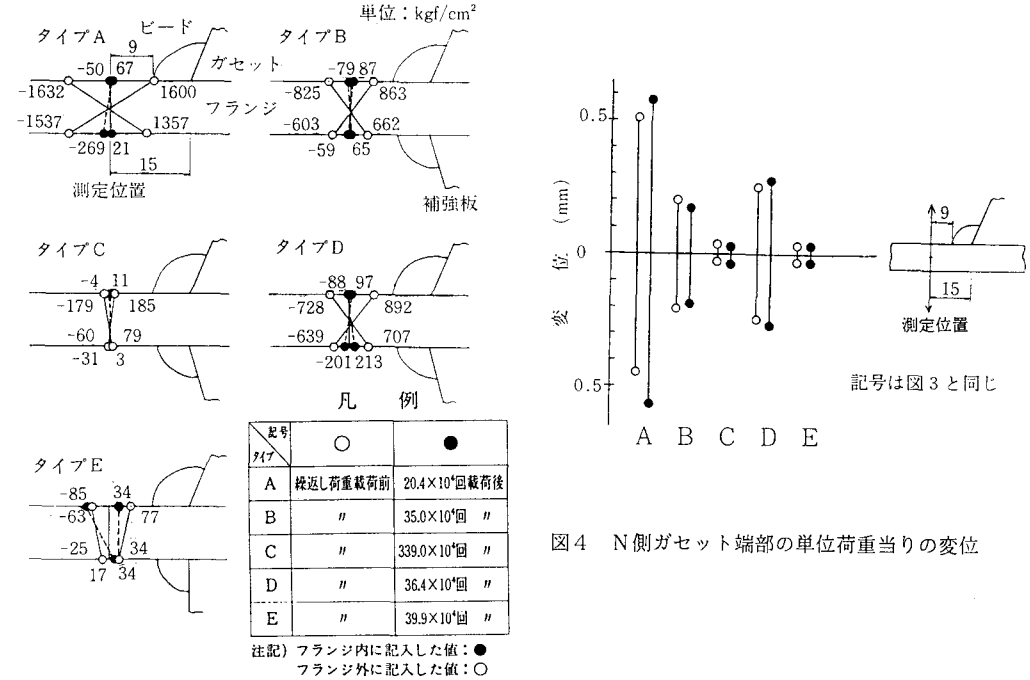


図3 N側ガセット端部の単位荷重当りの応力分布

N側補強板およびガセット端部に生ずる単位荷重当りの応力を図5に示す。測定位置①、③は補強板端部の補剛桁上・下フランジとのまわし溶接止端部近傍、測定位置②は垂直補剛材の補強板端部とのまわし溶接止端部近傍、測定位置④は補強材端部の補剛桁上フランジとのまわし溶接止端部近傍、測定位置⑤は補剛桁ウェブの補強材端部とのまわし溶接止端部近傍、測定位置⑥はガセット端部の補剛桁上フランジとのまわし溶接止端部近傍である。

補強板が補剛桁高さの途中までのタイプB、Dの測定位置①での応力はそれぞれ約210kgf/cm²、110kgf/cm²である。この応力に比してタイプB、Dの測定位置②での応力はそれぞれ約6倍、11倍である。これは荷

重載荷時に補強板が面内に回転することにより、垂直補剛材が面外に曲げられたためである。補強板を補剛桁高さ一杯まで伸したタイプCの測定位置①、③の応力はタイプDの測定位置①の応力に比して、それぞれ約1.5倍、同程度である。これは荷重を補強板を含めた補剛桁全体で受持っているために応力が小さくなっている。タイプEの測定位置④の応力はタイプDの測定位置①の応力に比して、約11倍である。これは荷重を補強材で受持たせているためである。またタイプEの測定位置⑤の応力はタイプDの測定位置①の応力に比して約2倍である。

N側ガセット端部の応力はガセット下側で補強板を補剛桁高さ一杯まで伸したタイプCの測定位置⑥で約240 kgf/cm²と小さい。補強板が補剛桁高さの途中までのタイプB、DはタイプCのそれぞれ約2倍、3倍の応力が、補剛桁ウェブに直角に補強材を配したタイプEはタイプCの約5倍の応力が生じている。このことよりガセットに対して直角方向に補剛桁フランジを補強した方が、カセットに対して同じ方向に補強したよりもガセット端部に発生する応力は大きくなる。補剛桁フランジを何等補強していないタイプAの応力はタイプEの応力に比して約2倍である。

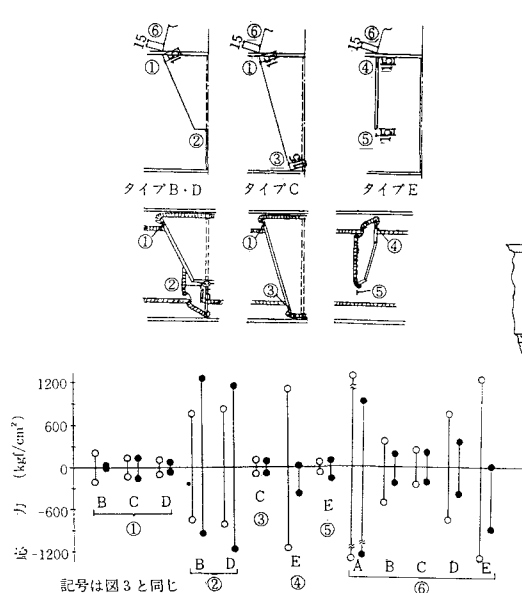


図5 N側補強板およびガセット端部の単位荷重当りの応力

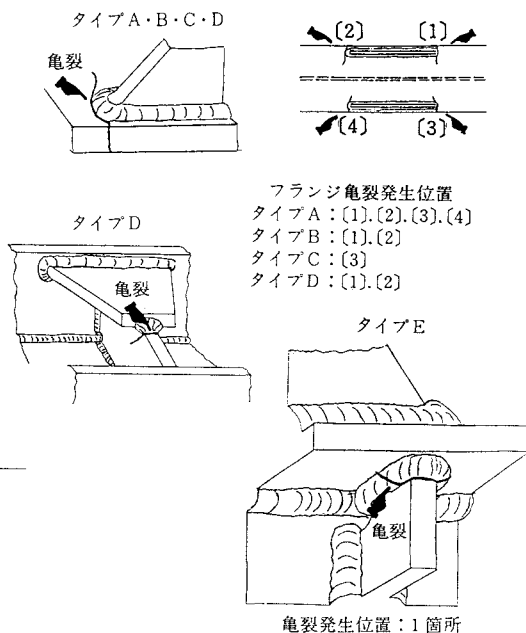


図6 各供試体の亀裂発生位置

3. 2 疲労試験結果

疲労試験の結果、各供試体での亀裂発生位置を図6に示す。タイプA、B、C、Dはフランジのガセット取付部または補強板取付部の溶接止端からフランジ厚さ方向に亀裂が生じ、タイプEでは補強材上縁のフランジとの溶接部に亀裂が生じた。なおタイプDでは補強板と中央の垂直補剛材とのまわし溶接止端にも亀裂が生じた。亀裂発生箇所を取り出して破面状況をスケッチしたものを図7に示す。また疲労試験結果として繰返し荷重と繰返し数（1/2荷重範囲の回数には含まない）を表2に示す。これらの図及び表より、試験結果としてつぎのことが言える。

1) タイプA（繰返し荷重；±1.0t）

フランジが補剛されていないタイプAは5体の中で載荷荷重が±1.0tと最も小さいにも係わらず、フランジのガセット端部に発生した応力は約 ±1620 kgf/cm²、及び変位は上下に約0.60mmと最も大きい。これは荷

重のほとんど全てをフランジの曲げで負担しているためである。ピーチマークは1箇所は3本が観察されたことから、初めの亀裂は載荷5万回のうちに、他の3箇所は5~10万回で生じた。疲労強度は最も低く、亀裂はフランジ上面のガセットまわし溶接止端からフランジ下面に向かって進展している。

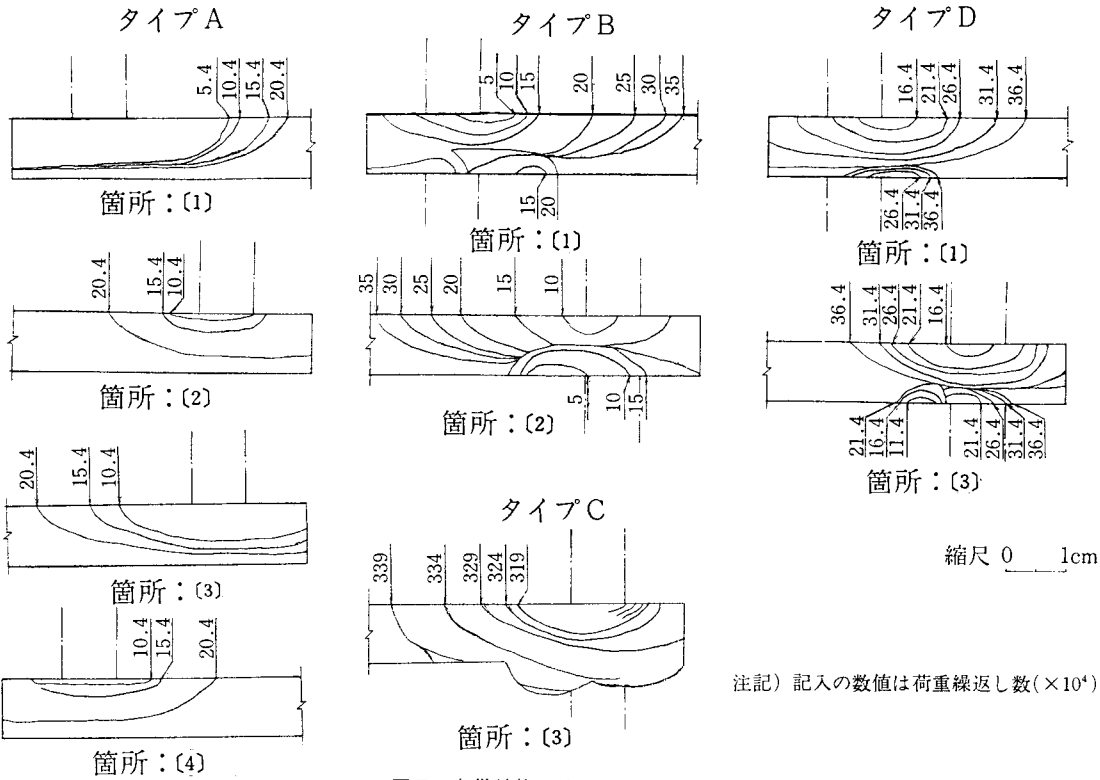


図7 各供試体の破面ピーチマーク形状

2) タイプBとD (繰返し荷重; $\pm 1.5t$)

垂直補剛材の外側に長さの短い補強板を付けたタイプBとDとの構造詳細の違いは、垂直材のウェブが補剛材フランジに連結されているか否かの違いである。フランジのガセット端部に発生した応力及び変位には、この違いによる差はあまり見られなかった。両タイプとも垂直補剛材の補強板端部との接合部に発生した応力(タイプB: $\pm 1130 \text{ kgf/cm}^2$ 、タイプD: $\pm 1230 \text{ kgf/cm}^2$)は、補強板端部のフランジとのまわし溶接止端部の応力(タイプB: $\pm 320 \text{ kgf/cm}^2$ 、タイプD: $\pm 160 \text{ kgf/cm}^2$)より大きかった。亀裂はフランジ上面のガセットまわし溶接止端に沿って発生した。破面よりフランジ下面からも亀裂が発生し、亀裂の発生はタイプBの5万回以下に比べてタイプDは6~11万回または11~16万回以下であると考えられる。亀裂がフランジから先に発生しているのは応力測定位置が止端から離れていたため、ピーク値が得られなかったためと考えられる。またタイプDは補強板と補剛材とのまわし溶接止端にも1箇所亀裂が生じた。

表2 疲労試験結果

タイプ	繰返し荷重 (ton)	繰返し速度 (Hz)	繰返し数 ($\times 10^4$)	
			亀裂発生(以下)	最終繰返し数
A	± 1.0	8	5.4 [1箇所]	20.4
			10.4 [3箇所]	
B	± 1.5	8	5.0 [2箇所]	35.0
			202.0 [なし]	
C	± 3.0	5	102.0	339.0
			20.0 [1箇所]	
D	± 1.5	8	11.4 [1箇所]	36.4
			16.4 [1箇所]	
E	± 2.0	8	39.9 [1箇所]	39.9

注記) []内数値は亀裂発生箇所数を示す。

これは荷重載荷時に補強板を溶接した垂直補剛材が面外方向に大きな曲げを受けていたためである。

3) タイプC (繰返し荷重; $\pm 3.0, \pm 4.5, \pm 5.5t$)

疲労強度が最も高いのは、補剛桁高さ一杯に補強板を付けたタイプCであった。供試体に亀裂が発生しなかったため、繰返し荷重は $\pm 3.0t$ から、 $\pm 4.5t$ 、 $\pm 5.5t$ と増加させた。この場合荷重は補剛桁と補強板から成る箱断面全体で負担しているため、発生応力はそれぞれの荷重時に $\pm 550 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\pm 820 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\pm 1000 \text{ kgf/cm}^2$ であり、応力、変位とも小さかった。このタイプはタイプEと同様、フランジ補強の効果が他のタイプに比べて高かった。ピーチマークより亀裂は繰返し数 300万回程度で発生したと判断される。亀裂はガセット端部のまわし溶接止端に沿ってフランジ上面より下面に向かって進展している。

4) タイプE (繰返し荷重; $\pm 2.0t$)

補剛桁ウェブに直角方向に補強材を付けたタイプEは、フランジのガセット端部の応力は $\pm 140 \text{ kgf/cm}^2$ 、変位は上下に 0.06 mm と小さかった。応力はタイプCに比べると約 $1/3$ である。補強材側のフランジとの接合部には $\pm 2260 \text{ kgf/cm}^2$ とかなり高い応力が発生した。亀裂は補強材取付部のまわし溶接止端から補強材の母材へと進展した。しかしフランジには亀裂が生じなかった。これはフランジの応力がタイプCより小さかったためである。

図8に各供試体の応力範囲と亀裂発生寿命の関係を示す。三木らの付加片付きの小型試験片による曲げ疲労試験の結果¹⁾と比較すると、フランジの曲げによって亀裂が生じたタイプA、B、C、Dはほぼその傾向にあるが、軸方向力により亀裂が生じたタイプEでは大きくはずれている。

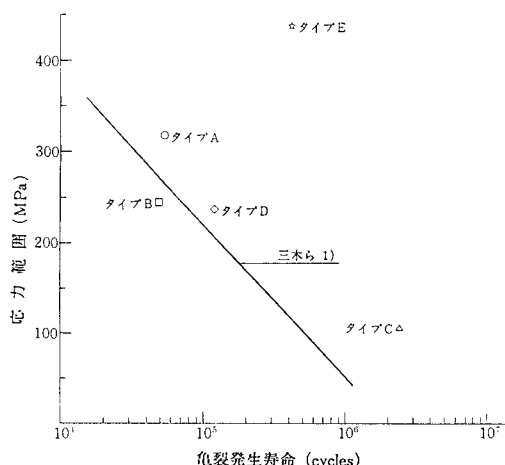


図8 各供試体の応力範囲と亀裂発生寿命の関係

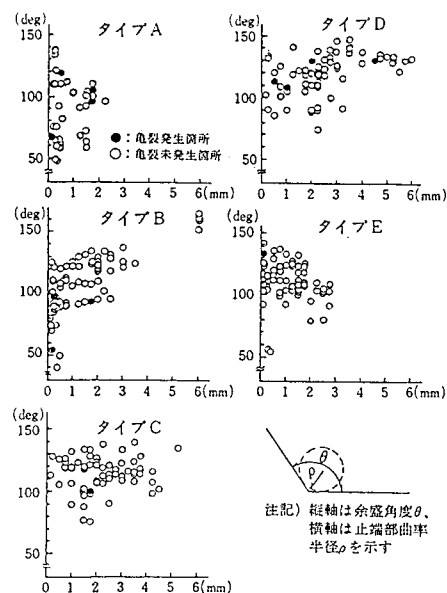
図9に止端部を型取りしたモデリングを約 1 mm 間隔にスライスして測ったビード形状 (ρ 、 θ) を示す。最初のピーチマークで亀裂発生箇所と思われる箇所に●印、それ以外は○印を付した。

①タイプAの ρ は $0 \sim 2 \text{ mm}$ 、 θ は $50 \sim 140 \text{ deg}$ の範囲でばらついている。この図より判断すると、 ρ のばらつきより θ のばらつきのほうが大きいと言える。

②タイプB、Dの ρ はタイプB: $0 \sim 4 \text{ mm}$ 、タイプD: $0 \sim 6 \text{ mm}$ 、 θ はタイプB: $50 \sim 140 \text{ deg}$ 、タイプD: $50 \sim 150 \text{ deg}$ の範囲でばらついている。この図より判断すると両タイプとも亀裂発生箇所の ρ は 2 mm 以下で分布している。

③タイプCの ρ は $0 \sim 5 \text{ mm}$ 、 θ は $60 \sim 140 \text{ deg}$ の範囲でばらついている。亀裂発生箇所の ρ は 2 mm 以下である。

④タイプEの ρ は $0 \sim 3 \text{ mm}$ 、 θ は $50 \sim 140 \text{ deg}$ の範囲でばらついている。亀裂発生箇所の ρ は 1 mm 以下で分布している。



注記) 縦軸は余盛角度 θ 、横軸は止端部曲率半径 ρ を示す

図9 溶接止端部余盛角度と止端部曲率半径の分布

箇所を明らかにすることができなかった。全体的にみて、各供試体のガセット取付部まわし溶接止端の ρ 、 θ には大きな差はないと考えられる。

4. むすび

本試験では、アーチ格点部の構造詳細の違いが、アーチの垂直材が二次応力により曲げを受けた場合の疲労強度に及ぼす影響を補剛桁側連結部の補剛ディテールに着目して明らかにすることができた。以下に結論を述べる。

- 1) 疲労に対して格段に優れているのは補強板を補剛桁高さ一杯まで伸したタイプCである。
- 2) ガセット取付部の補剛桁フランジを何等補強していないタイプAは疲労に対して最も好ましくない構造である。
- 3) フランジ縁に補剛桁高さの途中迄補強板を付けたタイプBとそれに垂直材ウェブも補剛桁フランジに連結したタイプDも垂直補剛材からの応力をスムーズに補剛桁に伝達していないのでそれ程の補強効果がなく、疲労に対してあまり好ましい補強方法とは言えない。
- 4) 補剛桁ウェブに直角方向に補強材を配したタイプEはタイプCについて優れた補強方法である。ただし補強材は十分な断面が必要であり、その端部の溶接についても注意を要する。なお施工性の面からは溶接し易い構造である。

謝辞

疲労試験を行なうにあたっては、埼玉大学工学部建設工学科 岡野賢司技官ならびに(株)栗本鐵工所の村田広治氏及び野村浩史氏に御協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 三木，坂野，豊田；隅肉溶接止端からの疲労亀裂の発生と初期進展挙動，構造工学論文集，VOL.35A,1989年3月

(1990年10月12日受付)